

«Санкт-Петербургский государственный университет»

Фундаментальная математика и механика

Гидроаэромеханика

Серяков Александр Алексеевич

Численное исследование влияния формы частиц потока газовзвеси на их
характеристики отскока от поверхности тела

Дипломная работа

Научный руководитель:

Профессор, доктор физико-математических наук В.А. Лашков

Рецензент:

Профессор, доктор технических наук Г.А. Акимов

Санкт-Петербург

2018

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Fundamental Mathematics and Mechanics

Hydroaeromechanics

Seryakov Aleksandr Alekseyevich

Numerical study of the influence of particle shape of gas-particle flow in their
rebound from the surface of the body

Graduation Thesis

Scientific supervisor:

Professor, Doctor of Physics and Mathematics V.A. Lashkov

Reviewer:

Professor, Doctor of Engineering G.A. Akimov

Saint-Petersburg

2018

Оглавление

Введение	4
1. Постановка задачи	8
1.1. Система основных уравнений.....	8
1.2. Описание компьютерной модели.....	11
2. Особенности задачи.....	13
3. Результаты исследования.....	16
3.1. Прямой удар.....	16
3.2. Морфологический анализ лунок.....	20
3.2.1. Прямой удар.....	20
3.2.2. Удар под углом 15 градусов	21
3.3. Осредненные данные численного расчета.....	22
Заключение.....	27
Список использованной литературы.....	29

Введение

Интенсивность и эффективность многих тепло- и массообменных процессов в современной теплоэнергетике, химической, нефтеперерабатывающей, строительной и других отраслях промышленности определяется явлениями, протекающими в дисперсных системах типа «газ – твердые частицы». Однако степень изученности этих систем различна. Вопросы о взаимодействии частиц с поверхностью возникают в различных областях гидроаэромеханики. Например, в задачах эрозии, где необходимо исследовать деформации и разрушения поверхности при различных условиях под воздействием на неё мелких твердых частиц. Также при изучении двухфазного потока (газ – твердые частицы) необходимо описать граничные условия для твердой фазы. Как правило, частицы взаимодействуют с поверхностью тела под разными углами к поверхности в широком диапазоне скоростей. При рассмотрении задач авиационно-космической техники диапазон скоростей удара составляет от 100 до 1000 м/с. При таких скоростях удар сопровождается сложными процессами упругих и пластических деформаций, нагревом и разрушением. Частицы, присутствующие в воздухе, имеют неправильную форму, так как являются мелкими обломками пород, и обладают весьма высокой твердостью. Обычно, для упрощения задачи, частицы рассматривают как недеформируемые сферы.

Для описания характера взаимодействия твердых частиц газовой взвеси с поверхностью тела принято использовать коэффициент восстановления скорости. Он позволяет определить как степень трансформации энергии, так и передачу импульса частицы. Как правило, для решения задачи вводят в рассмотрение коэффициенты восстановления нормальной k_n и касательной k_t составляющих скорости частицы:

$$k_n = -\frac{V_n}{V_{0n}}, \quad k_t = \frac{V_t}{V_{0t}},$$

где V_0, V - скорости частицы соответственно до и после удара, индексы n и t обозначают проекции, соответственно на нормаль и касательную к поверхности.

Эксперименты М. Sommerfelda, Н. Хубера [1], а также В. Табакова, М.Ф. Мэйлэка, А. Хамеда [2] показывают, что коэффициенты восстановления нормальной или касательной к поверхности компонент скорости в некоторых случаях могут принимать значения больше единицы. Данный факт объясняется тем, что в естественных условиях твердые частицы имеют форму далекую от сферической, а поверхность обтекаемого тела обладает шероховатостью. По данным работы З.Р. Горбиса [3] для дисперсных частиц геометрический коэффициент формы частиц наиболее часто встречающихся в природе находится в пределах от 1,02 до 3,17. Среднее же значение коэффициента формы частиц равно 1,49. В работах И.В. Деревича [4] и М. Sommerfelda, Н. Хубера [1] было исследовано влияние шероховатости поверхности на величину коэффициента восстановления скорости сферической частицы. Данные исследования показали, что шероховатость поверхности может значительно изменить величину среднестатистических коэффициентов восстановления скорости.

Если рассматривать частицу несферической формы, то при ударе даже о гладкую поверхность вектор контактной силы, как правило, не проходит через центр масс частицы. Это приводит к появлению момента силы, который заставляет частицу вращаться. Необходимо учитывать вращение частицы для построения траектории ее дальнейшего движения, так как появляются силы Магнуса, которые оказывают существенное влияние на траекторию движения частицы в потоке газа. В теоретической работе С.В. Панфилова, Ю.М. Циркунова [5] исследовалось влияние формы частиц на их рассеяние при отлете от поверхности. В данной работе рассматривались частицы в виде эллипсоида вращения, прямоугольной призмы и призмы с усеченными вершинами. Методом классической

механики было установлено, что индикатриса рассеяния частиц существенно зависит от их формы.

Ранее в работе В.А. Лашкова [6] был рассмотрен удар сферической частицы о поверхность при различных углах атаки. В работе А.С. Зотикова и В.А. Лашкова [7] исследовалась частица в форме эллипсоида вращения с соотношением осей равным 2 при прямом соударении с преградой.

Как уже было сказано ранее, в реальной жизни частицы редко или практически никогда не бывают правильной формы (в частности сферической), поэтому интересно рассмотреть поведение частицы отличной от сферической формы после соударения.

В качестве рассматриваемой частицы, как в работе А.С. Зотикова, В.А. Лашкова [7] была выбрана форма эллипсоида вращения, так как она наиболее проста в описании ее математической модели. Чтобы определить влияние формы частицы на характеристики ее отскока, было выбрано несколько отношений осей эллипсоида.

В данной работе рассматривается взаимодействие частицы с плоской поверхностью преграды под углами 15 и 90 градусов, см. Рис. 1. Скорость падающей частицы направлена под углом α к поверхности. Кинематические параметры движения отраженной частицы зависят от ее начальной ориентации относительно поверхности, поэтому следует исследовать статистическое распределение кинематических параметров. В случае эллипсоида вращения кинематические параметры отскока будут определяться не только скоростью удара, физико-химическими свойствами материалов частицы и поверхности, но и углами наклона главной оси эллипсоида к поверхности β и углом поворота вокруг вертикальной оси γ .

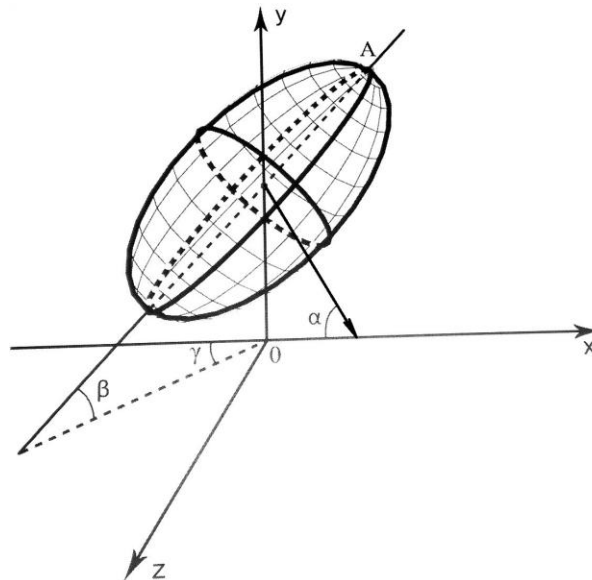


Рис. 1. Схема взаимодействия эллипсоида с поверхностью.

Основной целью является численное исследование влияния формы частиц (эллипсоид вращения) потока газовой взвеси на их характеристики отскока от поверхности тела. В работе И.В. Деревича [4] были получены данные для коэффициентов восстановления касательной и нормальной составляющих скорости. По этим данным было установлено, что коэффициент восстановления для составляющих скорости может принимать значения больше единицы. Интересно посмотреть, получатся ли аналогичные результаты при численном исследовании соударения. При проведении физического эксперимента нет возможности определить угловую скорость частицы после соударения, а также вращательную энергию. Поэтому, если полученные расчетные данные (для среднестатистических составляющих скорости, углов отлета) будут хорошо согласовываться с экспериментом, то это дает основание использовать значения вращательной энергии и угловой скорости вращения частицы, полученные в результате численного исследования соударения для определения траектории движения частицы после ударного взаимодействия с поверхностью преграды.

1. Постановка задачи

1.1. Система основных уравнений

Постановка задачи соударения твердых тел, разностная схема и методы моделирования подробно описаны в работе В.М. Фомина, Ю.М. Гулидова, Г.А. Сапожникова [8]. Основным инструментом для численного исследования является метод конечных элементов, который в совокупности с явным методом интегрирования по времени и постановкой задачи в лагранжевых координатах дает хорошие результаты при расчете упругопластического взаимодействия тел. Вычислительные методы для решения задачи о соударении тел реализованы в коммерческом программном пакете ANSYS [9], который использовался в настоящей работе при решении поставленной задачи.

Система основных уравнений, описывающая механику соударения тел, имеет следующий вид:

- уравнение неразрывности среды

$$\rho_0 W_0 = \rho W ,$$

где ρ - плотность материала, W - объем,

- уравнение сохранения импульса

$$\begin{aligned}\rho \ddot{x} &= b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ \rho \ddot{y} &= b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} , \\ \rho \ddot{z} &= b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\end{aligned}$$

где σ - тензор напряжений, b - вектор массовых сил,

- закон сохранения внутренней энергии

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{e}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{e}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{e}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{e}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{e}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{e}_{zx}) ,$$

где $e_{i,j}$ - тензор деформаций.

На поверхности контакта были поставлены граничные условия: скольжение материалов при наличии кулоновского трения. Если коэффициент трения μ , то сила трения определяется следующим выражением

$$T = \mu |N| q,$$

где q - единичный вектор на касательной плоскости контакта, направленный против вектора относительной скорости. Граничными условиями являются равенство нормальных скоростей на поверхностях, принадлежащих границе, и противоположность сил реакции. Рассматривая удар под углом, необходимо учитывать силы трения, так как их наличие существенно сказывается на результатах взаимодействия. При появлении касательной составляющей скорости появляется сила трения, препятствующая скольжению частицы по поверхности куба. В данной модели принято, что коэффициент трения зависит от скорости взаимодействующих поверхностей V_t :

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-cV_t},$$

где μ_d - динамический коэффициент трения, μ_s - статический коэффициент трения, c - заданная константа. Частице задавались начальная скорость $V_0(0, V_{y0}, 0)$ при прямом соударении, $V_0(V_{x0}, V_{y0}, 0)$ при ударе под углом и ориентация в пространстве посредством углов β, γ .

В разработанной математической модели в качестве материалов частиц и преграды используются металлы, которые подвергаются большим деформациям, высоким скоростям деформации и высоким температурам. Поэтому для определения напряжений в области пластических деформаций использовался метод Джонсона-Кука [10,11]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}),$$

где σ - динамический предел текучести, ε - интенсивность пластической деформации, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ - безразмерная скорость пластической деформации, определяемая как отношение мгновенной скорости пластической деформации $\dot{\varepsilon}$ к ее пороговому значению $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$, $T^* = (T - T_0)/(T_{nl} - T_0)$ - гомологическая температура, где T - абсолютная мгновенная температура образца, T_0 - комнатная температура, T_{nl} - температура плавления образца. Абсолютная мгновенная температура образца T определяется как сумма начальной абсолютной температуры образца и приращения температуры при его пластическом деформировании. Уравнение содержит пять материальных констант, которые определяются эмпирическим путем: A - статический предел текучести, B - модуль деформационного уплотнения, n - показатель степени в законе деформационного упрочнения, C - коэффициент скорости деформации, m - показатель степени в законе температурного разупрочнения.

1.2. Описание компьютерной модели

В качестве материала для частицы была взята сталь со следующими параметрами: плотность 7810 кг/м^3 , модуль Юнга $2 \cdot 10^8 \text{ КПа}$, коэффициент Пуассона 0,3.

Для куба был задан материал – Al2024T351 (Дюраль Д16Т).

Скорость частицы $V_0 = 100 \text{ м/с}$.

Для выбранной пары материалов были приняты следующие значения для коэффициента трения [12]: $\mu_d = 0,15$; $\mu_s = 0,61$; $c = 1/50$.

Была создана модель эллипсоида, как тела вращения. В качестве фигуры для вращения был взят эллипс с длинами полуосей с соответствующими отношениями: $h = 1; 1,3; 1,5; 2; 3$. Наибольший интерес представляет частица $h = 3$. Она была смоделирована по работе З.Р. Горбиса [3] с учетом среднего значения коэффициента формы (безразмерная величина), который в данном случае равен 1,2. Масса частиц m принималась одинаковой и была равна 16 мг. В качестве преграды выступал куб с размерами 50x50x50 мм. Нижнюю часть куба считали зафиксированной.

Предполагалось, что эллипсоид испытывает только упругие деформации, в то время как преграда испытывает упругопластические деформации.

Расчетная сетка задавалась путем разбиения частицы и преграды на элементарные тетраэдры. Размер элементов сетки был выбран таким образом, чтобы обеспечить погрешность расчетов не хуже 5%. Область контактной поверхности задавалась сферой диаметром 6 мм. В этой области сетка имела размер 0,05 мм. В остальных частях сетка имела гораздо больший размер – 10 мм. Это сделано для того, чтобы уменьшить вычислительные затраты в областях модели, не подвергающихся большому

одействию от удара. Размер элемента расчетной сетки частицы составлял 0,02 мм.

2. Особенности задачи

В настоящей работе рассматриваются два угла наклона вектора скорости к поверхности тела $\alpha = 15$ и $\alpha = 90$ градусов.

Поместим центр координат на поверхность соударения так, чтобы центр масс частицы имел координаты $X=0$, $Z=0$, ось Y направлена по нормали к поверхности соударения, X и Z соответственно на поверхности. См. Рис. 1.

При $\alpha = 90$ (прямой удар) имеет место симметрия относительно оси Y . Решение не зависит от угла γ , а определяется только углом β . Для решения задачи достаточно рассмотреть диапазон изменения угла β равный $0 \leq \beta \leq 90$ градусов.

Найдем математическое ожидание искомых величин для прямого удара. Представим, что каждой точке верхней полусферы, центр которой расположен на плоскости, соответствуют свои параметры отскока эллипсоида (коэффициент восстановления, угол отскока). При этом параметры для одной широты, которая определяется углом β между радиус-вектором точки полусферы и плоскостью, постоянны. В этом случае математическое ожидание искомой величины \bar{X} определится как:

$$\bar{X} = \frac{\int X dS}{S} = \int_0^{\pi/2} X \cos \beta d\beta,$$

где dS - площадь пояса сферы, S - площадь поверхности полусферы.

При $\alpha = 15$ (косой удар) имеет место симметрия относительно плоскости XOY . Тогда будем рассматривать угол γ в диапазоне $0 \leq \gamma \leq 180$. Аналогично случаю $\alpha = 90$ угол $0 \leq \beta \leq 90$. Шаг по β и γ равен 15 градусов.

Таким образом, задавая угол наклона вектора скорости α и различные углы β и γ , мы можем описать все интересующие нас случаи соударения частицы с поверхностью.

Определим способ расчета математического ожидания искомых величин при $\alpha = 15$ градусов. Представим, что каждой точке на сферической поверхности с радиусом $r=1$ с координатами β и γ соответствует конкретное расчетное значение параметра отскока. Исходя из симметрии, указанной ранее, рассматриваемая часть сферы сокращается до четверти сферы.

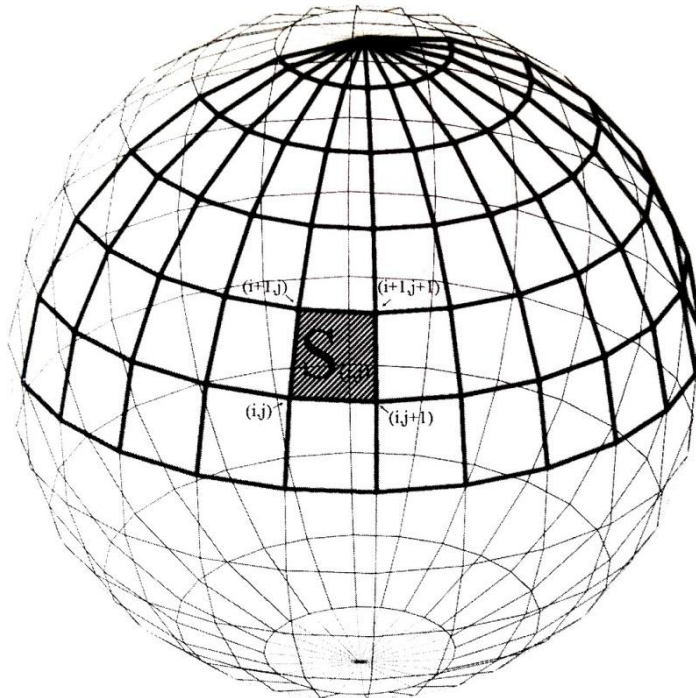


Рис. 2. Схема расчета среднестатистических параметров соударения твердой частицы.

Итого, имеем поверхность четверти сферы в виде сетки с шагом в 15° по β и γ . См. Рис. 2.

Математическое ожидание искомой величины будет рассчитываться как сумма произведений средних значений величины в ячейках, образованных узлами сетки, и вероятности попадания точки A в данную ячейку:

$$\bar{X} = \sum_{i,j} X_{i,j} P_{i,j},$$

где $X_{i,j}$ - среднее значение искомой величины в области с вероятностью попадания в нее полюса эллипсоида равной $P_{i,j}$. Вероятность рассчитывается как отношение площади ячейки $S_{i,j}$ и общей площади, т.е. четверти площади поверхности сферы S :

$$P_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{S}.$$

Среднее значение искомой величины в ячейке будем искать как среднеарифметическое значений величины в узлах данной ячейки:

$$X_{i,j} = (x_{i,j} + x_{i+1,j} + x_{i,j+1} + x_{i+1,j+1}) / 4,$$

в случае ячеек около полюса сферы всего три узла образуют ее, следовательно:

$$X_{i,j} = (x_{i,j} + x_{i+1,j} + x_{i,j+1}) / 3.$$

Таким образом, зная значения искомой величины в узлах сетки, мы можем найти её математическое ожидание на четверти сферы и, следовательно, на всей сфере. Т.е. мы можем найти ожидаемый угол, скорость и энергию отлета частицы при фиксированном угле α .

3. Результаты исследования

3.1. Прямой удар

Расчеты соударения частицы с поверхностью производились при следующих допущениях. Предполагалось, что частица имеет достаточно малый размер, чтобы не принимать во внимание волновые процессы при ударе. Силами тяжести, адгезии, а также аэродинамическими силами при движении частицы пренебрегалось.

Так как плоскость XOY является плоскостью симметрии, считаем, что частица в среднем будет отскакивать именно в этой плоскости.

Как показано на Рис. 3, коэффициент восстановления нормальной составляющей скорости эллипсоида при ударе под углом 90 градусов сильно зависит от формы частицы. С увеличением h наблюдается отклонение от данных, предоставленных для сферической частицы. Для $h = 1,3$ и $h = 1,5$ изменение происходит монотонно. Сначала монотонное убывание до 45 градусов, далее - монотонное возрастание. Начиная с 2 и заканчивая 3, коэффициент восстановления претерпевает резкие скачки. Диапазон скачков достаточно велик - от 0,02 до 0,4. Данные отклонения объясняются характером соударения частиц различной формы. Далее эти отклонения будут объяснены при морфологическом анализе лунок, оставленных частицей после соударения с преградой.

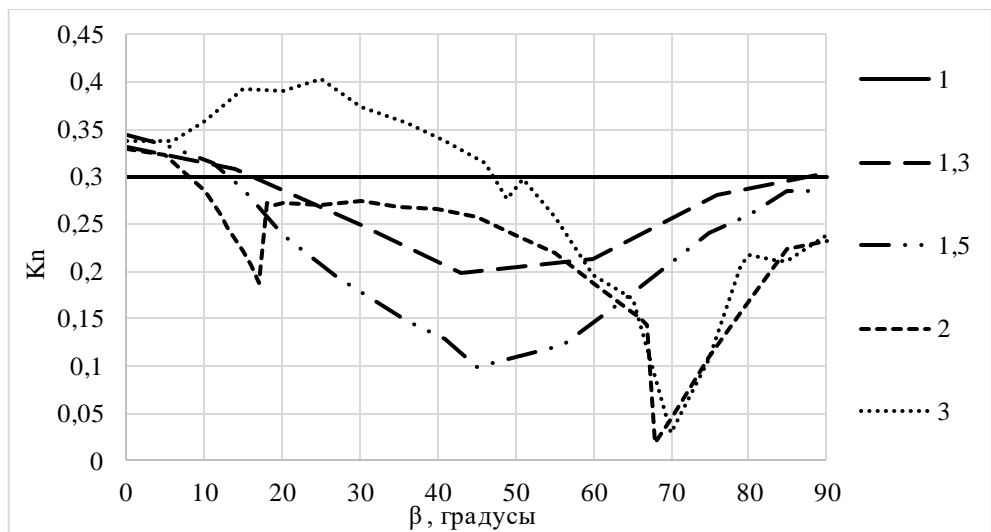


Рис. 3. Зависимость коэффициента восстановления нормальной составляющей скорости от угла наклона частицы при прямом ударе.

Помимо нормальной составляющей скорости отраженная частица неправильной формы обладает ненулевой касательной составляющей скорости, кроме двух случаев, когда $\beta = 0$ и $\beta = 90$ градусов. См. Рис. 4.

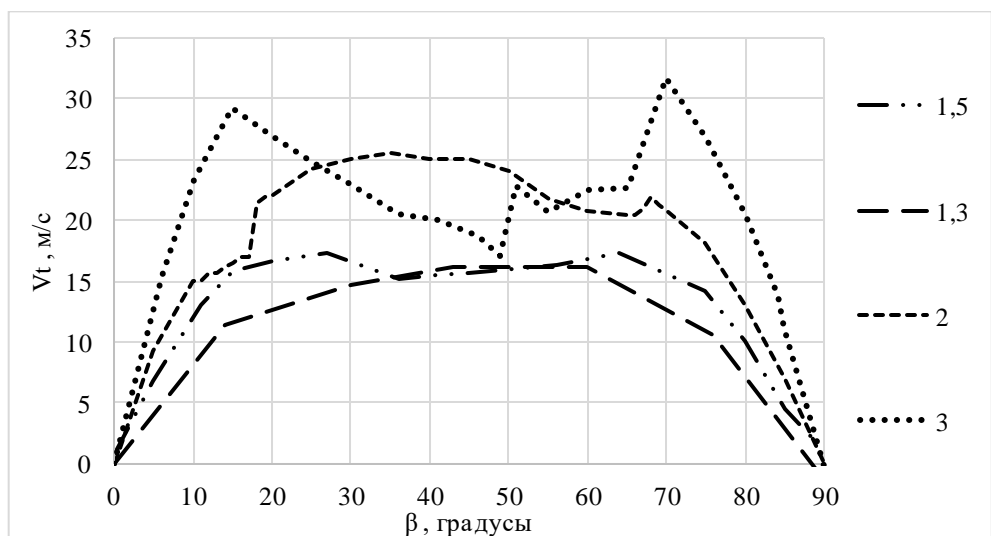


Рис. 4. Зависимость касательной составляющей скорости от угла наклона частицы при прямом ударе.

Для сферической частицы при прямом ударе касательная составляющая скорости отсутствует. При увеличении h до 1,3 наблюдается монотонное возрастание до 45 градусов и далее - монотонное убывание. Для частиц 2 и 3, как и в случае с нормальной составляющей скорости, картина

резко меняется, и появляются сильные перепады. Важно отметить, что касательная скорость достигает значительной величины равной 31,7 м/с. Это приводит к рассеянию отраженных частиц.

Исходя из полученных данных, можно рассчитать угол отлета θ . См. Рис. 5.

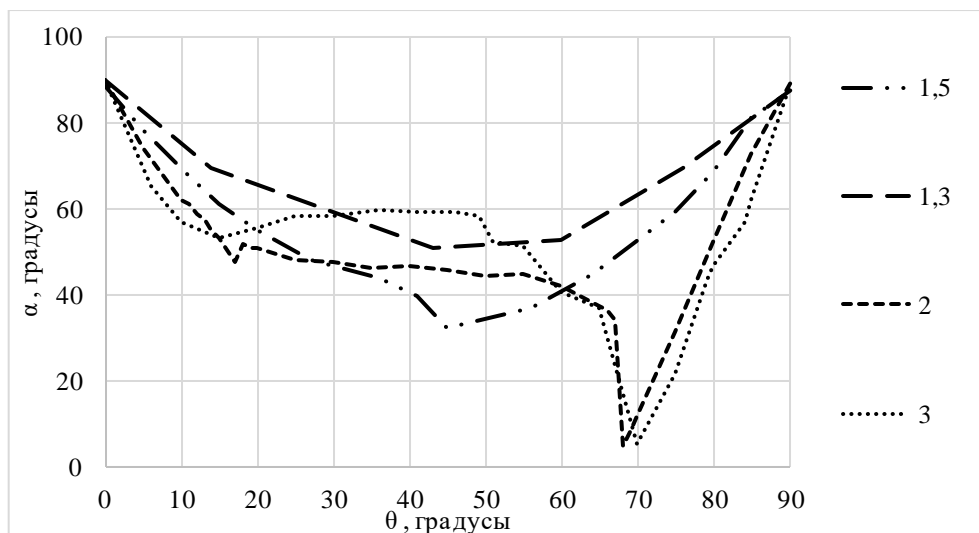


Рис. 5. Зависимость угла отлета от угла наклона частицы к поверхности при прямом ударе.

Отметим, если для облака частиц в форме эллипсоида вращения средние угловая скорость и касательная к поверхности скорость отраженных частиц равны нулю, то для каждой конкретной частицы эти параметры весьма значительны. Как можно видеть на Рис. 5, угол отлета частиц в диапазоне $0 \leq \beta \leq 60$ градусов, не сильно отличается для различных h . Когда $60 \leq \beta \leq 80$, наблюдается резкое уменьшение угла отлета для частиц 2 и 3 вплоть до 5 градусов. Данное падение объясняется сильным уменьшением нормальной составляющей скорости и высокой касательной составляющей скорости в данном диапазоне угла β .

В результате численного решения данной задачи были получены значения кинетической энергии частицы. Основываясь на наших предположениях, были найдены поступательная и вращательная энергии частицы, которые приведены ниже в безразмерном виде на Рис. 6 и Рис. 7.

Как видно из графиков, поступательная энергия уменьшается при возрастании h от 1,3 до 1,5. Дальнейшее увеличение h меняет картину кардинально. Появляется зона возрастания поступательной энергии.

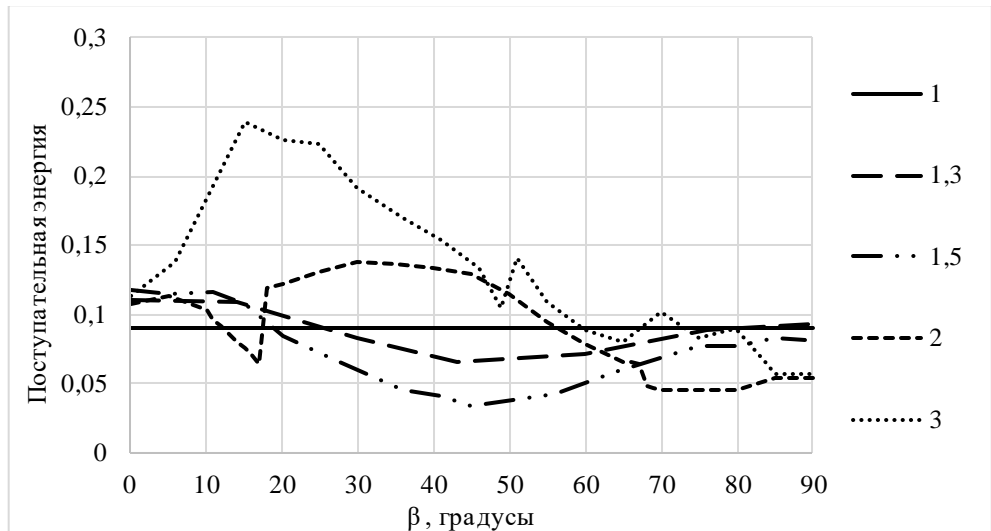


Рис. 6. Зависимость поступательной энергии от угла наклона частицы к поверхности при прямом ударе.

Вращательная энергия возрастает с ростом h , до $h=1,5$. Далее с появлением перекачивания и двойного соударения, которые прерывают вращение частицы, вращательная энергия уменьшается в то время, как поступательная энергия возрастает. См. Рис. 7.

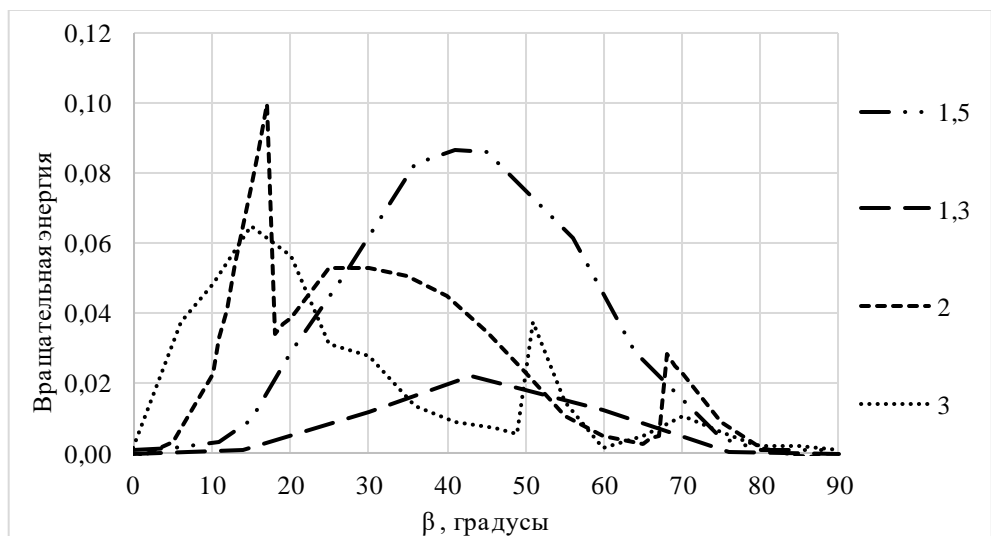


Рис. 7. Зависимость вращательной энергии от угла наклона частицы к поверхности при прямом ударе.

3.2. Морфологический анализ лунок

3.2.1. Прямой удар

В результате морфологического анализа лунок, оставленных на поверхности после соударения эллипсоида с различным соотношением полуосей было установлено, что для частиц $h = 1; 1,3; 1,5$ взаимодействие однократное (внедрение в материал и отскок) для всех значений угла β . Края лунки имеют ровные очертания.

Для частицы $h = 2$ и 3 картина меняется. Для наглядности рассмотрим частицу $h = 3$. В диапазоне углов $0 \leq \beta \leq 8$ и $80 \leq \beta \leq 90$ градусов можно считать, что взаимодействие однократное, и края лунки имеют ровные очертания. См. Рис. 8 (4). При $8 \leq \beta \leq 50$ лунка имеет вытянутые границы в одну сторону, исходя из этого, можно говорить, что частица при взаимодействии перекачивается по поверхности. См. Рис. 8 (1). Данный вид взаимодействия характерен тем, что при таком соударении частица теряет намного меньше энергии, а, следовательно, она отлетает с большей нормальной скоростью. В диапазоне $50 \leq \beta \leq 80$ лунка состоит из двух не связанных между собой кратеров, что говорит о двукратном взаимодействии. См. Рис 8 (2). Именно двукратное взаимодействие дает нам столь резкие падения нормальной составляющей скорости и угла отлета частицы.

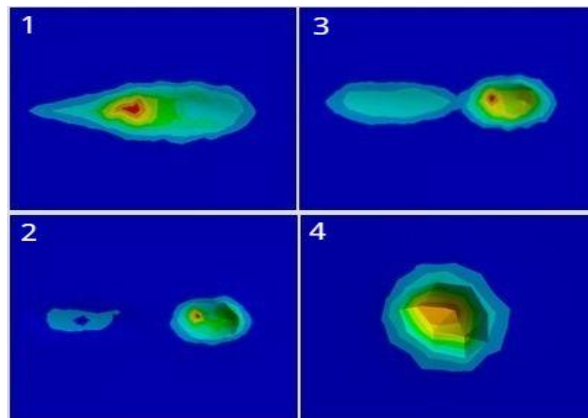


Рис. 8. Характерные виды кратеров после прямого соударения для частицы $h = 3$. 1, 2 – перекачивание, 3 – двойной удар, 4 – одиночный удар.

3.2.2. Удар под углом 15 градусов

При морфологическом анализе лунок, оставленных частицей после соударения под углом $\alpha = 15$ градусов, видно, что кратеры во всем диапазоне углов β и γ являются вытянутыми в одну сторону. Это позволяет говорить нам о том, что частица в процессе взаимодействия проскальзывает по поверхности в направлении проекции вектора скорости. См. Рис. 9 (1). Также стоит отметить, что в отличие от прямого соударения, кратеры при двукратном взаимодействии могут находиться не на одной линии. Это происходит от того, что положение частицы в пространстве определяется не только углами α и β , но и углом γ . См. Рис. 9 (2). В остальном, все виды взаимодействия остаются прежними.

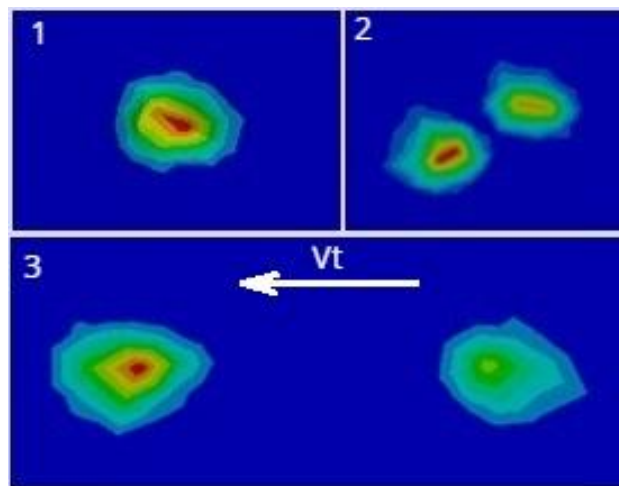


Рис. 9. Характерные виды кратеров после удара под углом $\alpha = 15$ соударения для частицы $h = 3$.

3.3. Осредненные данные численного расчета

Главной задачей было определение средних значений параметров отскочивших частиц для дальнейшего сравнения с данными для сферической частицы и с экспериментальными данными. На Рис. 10 предоставлены средние значения нормальной составляющей скорости в зависимости от h . При прямом соударении (точки) k_n меняется в небольшом диапазоне – от 0,23 до 0,32. Важной особенностью является нелинейность изменения k_n с ростом h . Так, для $h=1; 1,3; 1,5$ k_n монотонно убывает, далее, с ростом h , происходит возрастание значений k_n . Данный переломный момент объясняется появлением таких важных видов взаимодействия, как перекачивание и двойное соударение. Необходимо добавить, что с ростом h значения k_n не будут увеличиваться до бесконечности. Для $h=3$ при прямом соударении значение k_n больше, чем для сферической частицы, но при ударе под углом в 15 градусов к поверхности, картина противоположна, и значение k_n меньше, чем у частицы в форме сферы.

Сравнивая экспериментальные данные, полученные в работе [6], с частицей в форме эллипсоида вращения $h=3$ (именно она представляет для нас наибольший интерес, так как она была смоделирована с учетом коэффициента формы реальных частиц $f=1,2$) было установлено удовлетворительное совпадение (разница не более 15%). Необходимо сказать, что эксперимент проводился с другим набором материалов, а также с меньшей скоростью $V_0 = 85$ м/с. Стоит отметить, что в ходе эксперимента [7] было получено, что коэффициент восстановления нормальной или касательной скорости достигает значений больше 1. Действительно, в ходе численного исследования при $60 \leq \beta \leq 80$ и $0 \leq \gamma \leq 40$ коэффициент нормальной составляющей скорости принимал значения большие 1 вплоть до 1,26.

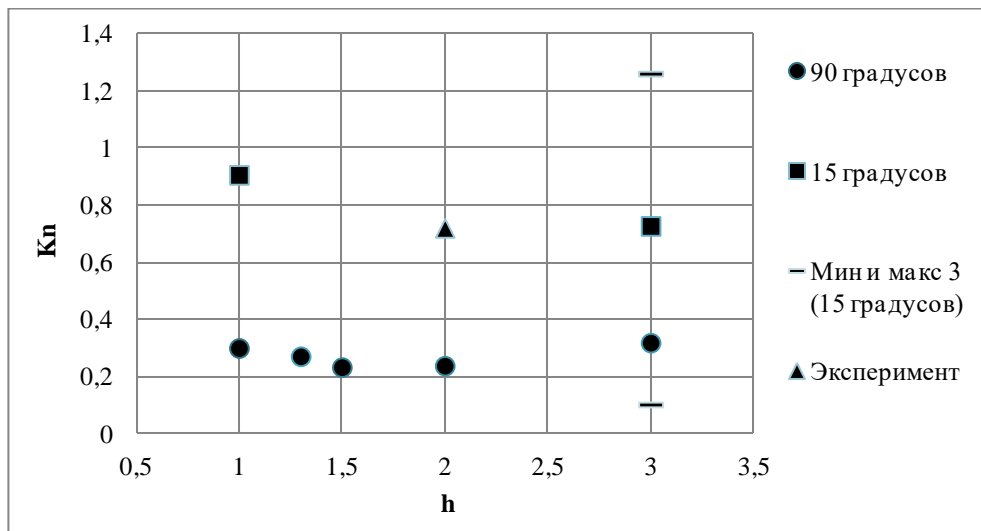


Рис. 10. Зависимость коэффициента восстановления нормальной составляющей скорости от h .

На Рис. 11 представлена зависимость касательной скорости от h . Касательная скорость играет важную роль в описании характера взаимодействия частицы с преградой, так как ее наличие приводит к рассеиванию частиц, что в дальнейшем может привести к разрушению объектов, расположенных на пути следования данных частиц. Как видно по Рис. 11, с увеличением h касательная скорость возрастает как при ударе под углом, так и при прямом соударении.

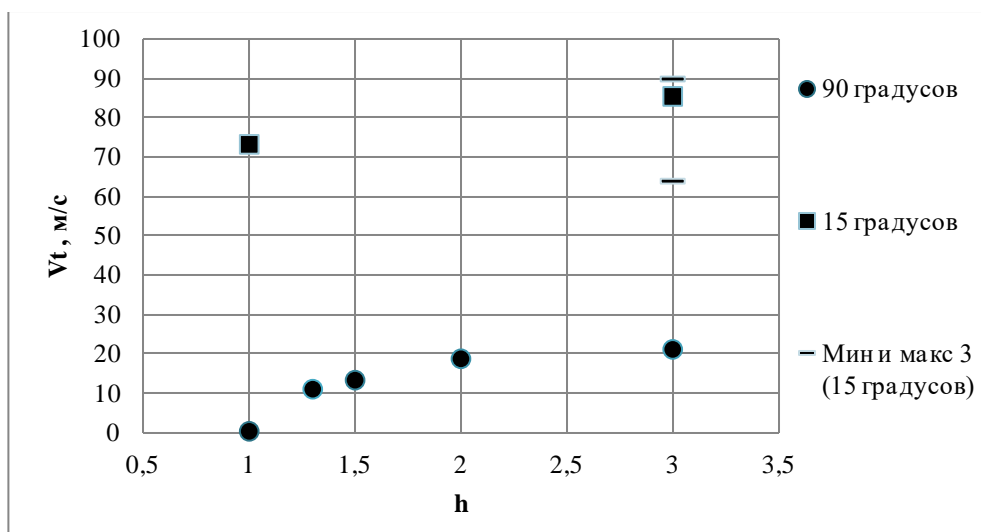


Рис. 11. Зависимость касательной составляющей скорости от h .

Сравнивая полную скорость частиц после соударения (См. Рис. 12), было установлено, что в диапазоне $1 \leq h \leq 2$ она изменяется незначительно. Но при $h = 3$ как при прямом ударе, так и при ударе под углом полная скорость выше на 10 м/с по сравнению со сферической частицей. Сравнение с экспериментальными данными также дает удовлетворительное совпадение.

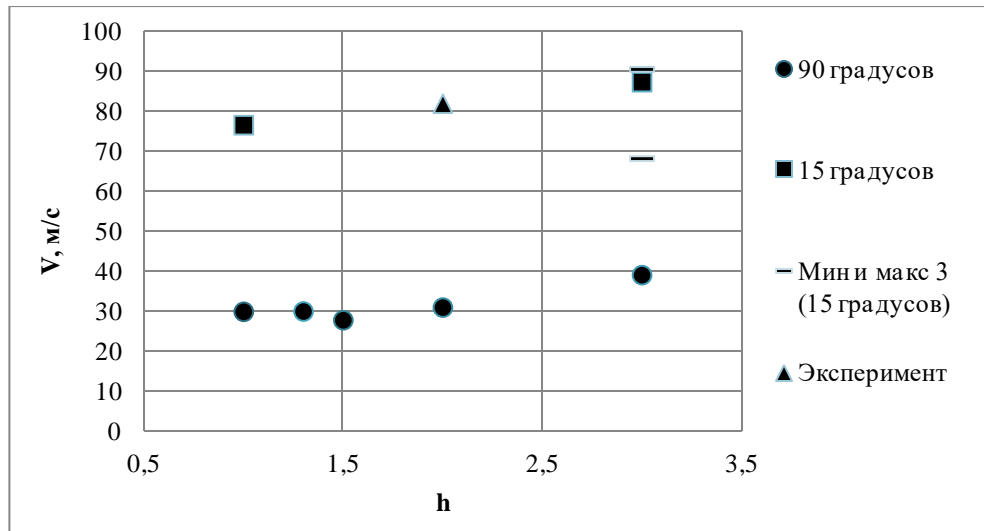


Рис. 12. Зависимость полной скорости от h .

Зная касательную и нормальную составляющие скорости после удара, а также математическое ожидание данных параметров, можно определить наиболее вероятный угол отлета частиц. См. Рис. 13. При ударе под углом 90 градусов видно, как сильно зависит угол отлета частицы от ее формы. С увеличением h рассматриваемый угол уменьшается вплоть до 50 градусов, но при достижении значения $h = 2$ далее начинается увеличение данного угла. Важным является факт того, что данное уменьшение с последующим увеличением h не вернется к значению равному нулю. При ударе под углом 15 градусов наблюдается не сильное отклонение данных, полученных для сферы и эллипсоида $h = 3$.

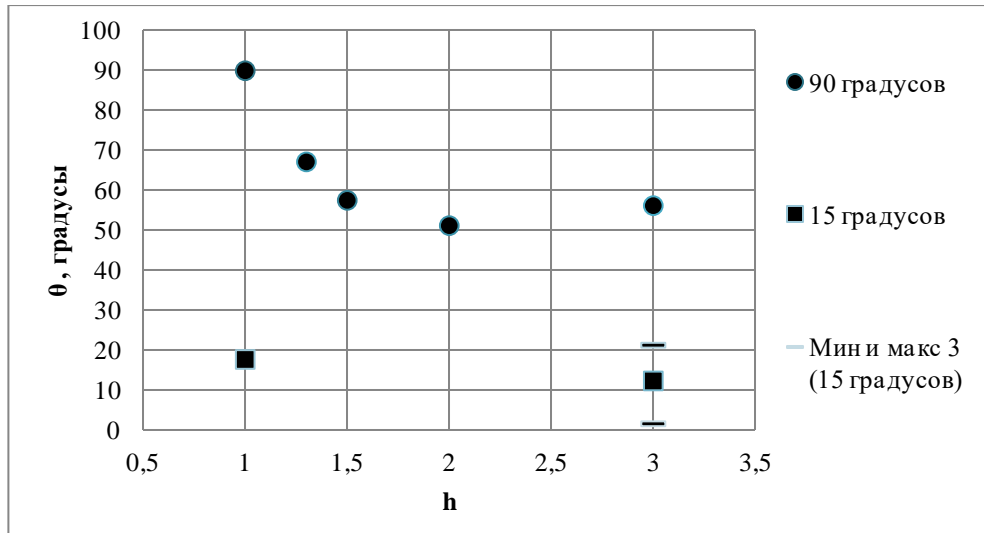


Рис. 13. Зависимость угла отлета частицы θ от h .

Получены кинетическая, поступательная и вращательная энергии. Поступательная энергия (См. Рис. 14) ведет себя аналогично полной скорости, так как в полной мере зависит от нее. Поступательная энергия частицы $h = 3$ имеет достаточно большой диапазон изменения.

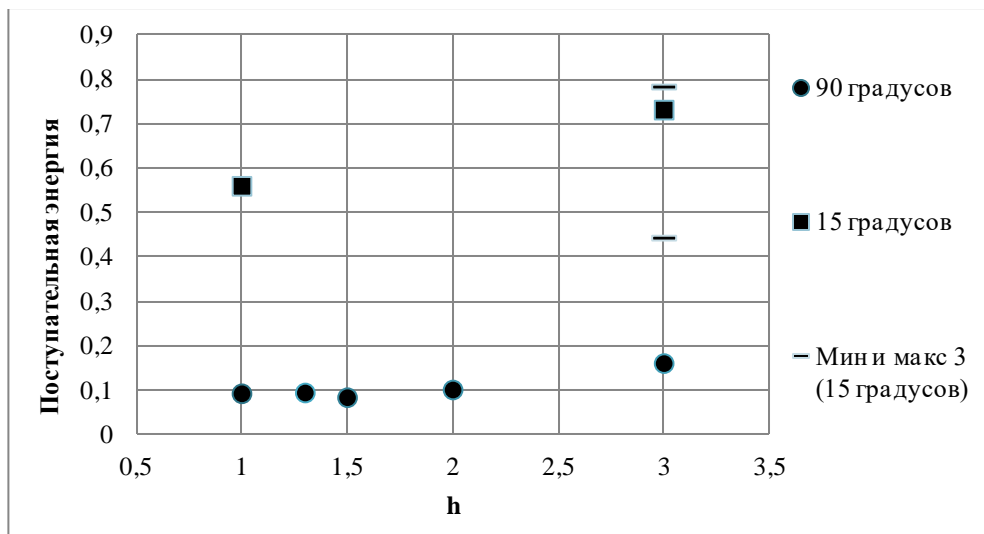


Рис. 14. Зависимость поступательной энергии от h .

Что касается вращательной энергии (См. Рис. 15.), то здесь картина довольно интересная. При $1 \leq h \leq 1,5$ для прямого удара происходит быстрый рост вращательной энергии, при $h = 2$ энергия достигает значения равного 0,038. Далее вращательная энергия уменьшается за счет появления двойного соударения, которое прерывает или уменьшает вращение частицы. Удар под

углом имеет несколько иную картину. Частица в форме сферы приобретает достаточно большую вращательную энергию в то время, как для частицы $h = 3$ данная энергия более чем в два раза меньше. Видно, что вращательная энергия для частицы $h = 3$ изменяется в зависимости от начальной ориентации в широких диапазонах.

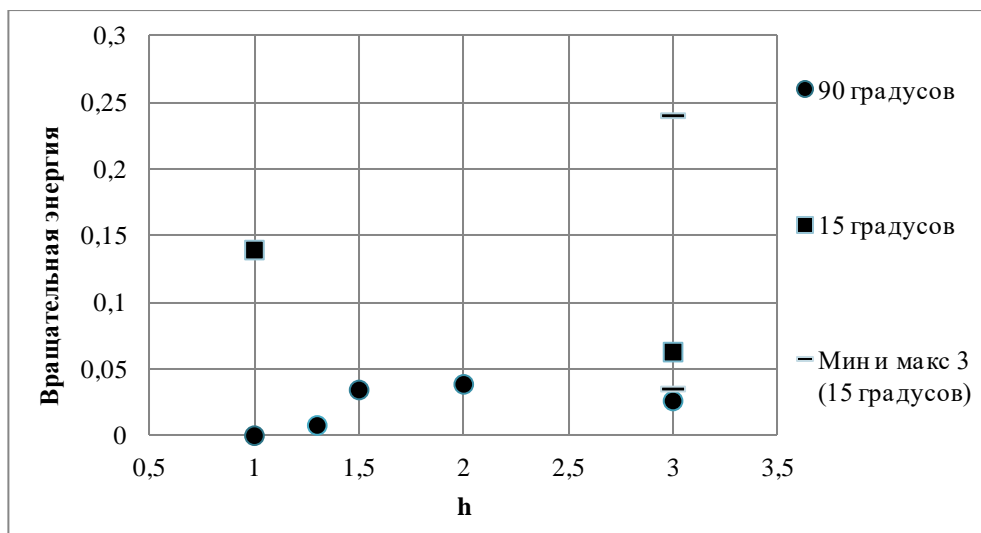


Рис. 15. Зависимость вращательной энергии от h .

Кинетическая энергия отраженной частицы с ростом отношения h увеличивается линейно как для прямого удара, так и для удара под углом.

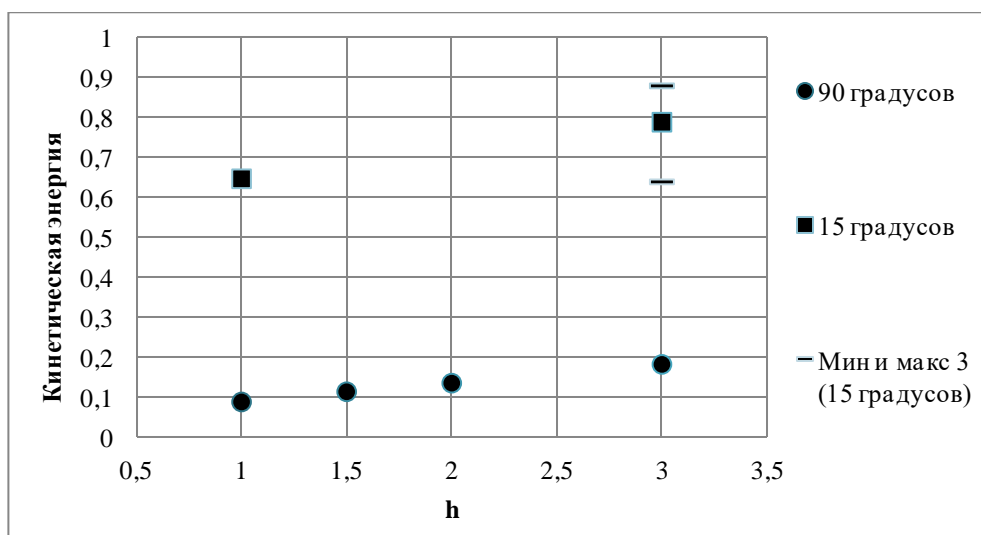


Рис. 16. Зависимость кинетической энергии от h .

Заключение

Основной целью работы являлось численное исследование влияния формы частиц (эллипсоид вращения) потока газовзвеси на их характеристики отскока от поверхности тела.

Для достижения поставленной цели были рассмотрены частицы в форме эллипсоида вращения с отношениями полуосей $h = 1; 1,3; 1,5; 2; 3$ при углах атаки $\alpha = 15$ и $\alpha = 90$ градусов с начальной скоростью $V_0 = 100$ м/с.

Результаты, полученные для прямого соударения, показали, что сравнительно небольшое отклонение формы частиц от сферической (результаты для которой приведены в работе [7]) приводит к появлению важных с точки зрения дальнейшего движения частицы явлений. Одним из таких явлений является появление касательной скорости отлетевшей частицы. Она достигает достаточно больших скоростей, а именно $V_{t \max} = 21$ м/с. Ее присутствие приводит к сильному рассеиванию частиц после соударения. Угол отлета отраженных частиц может изменяться в диапазоне 40 градусов. Кроме касательной скорости, частица приобретает вращение, которое приводит к появлению сил Магнуса, они в свою очередь, будут сильно влиять на траекторию движения частицы после соударения. Стоит уточнить, что при прямом соударении у сферической частицы отсутствует вращательная энергия, в то время как у эллипсоида она есть, но при ударе под углом 15 градусов вращательная энергия у сферической частицы вдвое больше, чем у частицы в форме эллипсоида вращения. Это объясняется наличием двойного соударения и перекачивая, которые гасят вращение. Увеличение h влечет за собой повышение полной скорости частиц после контакта с поверхностью.

При морфологическом анализе лунок было установлено, что использование частицы несферической формы влияет на характер

деформации преграды. В случае использования эллипсоида вращения в качестве частицы, лунки имеют три различные формы: одиночная с ровными краями, одиночная вытянутая в одну сторону, и двойная.

Сравнивая данные эксперимента, приведенные в работе В.А. Лашкова [6] с результатами численного исследования, было установлено удовлетворительное совпадение, с погрешностью не более 15 %. Наряду с этим, подтверждены результаты И.В. Деревича [4], говорящие нам о наличии коэффициента восстановления компонент скорости большего единицы. При численном решении задачи он достигал значения равного 1,26.

Удовлетворительное совпадение расчетов с данными эксперимента показывает нам достаточно высокую точность выбранной нами модели, но для того чтобы убедиться в этом полностью, необходимо рассмотреть столкновение и под другими углами атаки α .

Список использованной литературы

1. Sommerfeld M., Huber N. Experimental analysis and modeling of particle-wall collisions // International journal of multiphase flow. 1999. Vol. 25. P. 1457–1489.
2. Табаков В., Мейлэк М. Ф., Хамед А. Измерение лазером характеристик отскакивания твердых частиц при соударении их с поверхностью из алюминиевого (2024) и титанового (6Al-4V) сплавов // Аэрокосмическая техника. 1987. №12. С. 58–64.
3. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. М., «Энергия», 1970 г. 424 с. с илл.
4. Деревич И. В. Вероятностная модель столкновения частиц с шероховатой поверхностью// Прикладная механика и техническая физика. 1999. Т. 40. № 5. С. 239–244.
5. Панфилов С. В., Циркунов Ю. М. Рассеяние несферических частиц примеси при отскоке от гладкой и шероховатой поверхностей в высокоскоростном потоке газозвеси // Прикладная механика и теоретическая физика. 2008. Т. 49. №2. С. 79–88.
6. Лашков В.А. Коэффициент восстановления скорости при ударе под углом Вестник СПбГУ. Сер. 1. 2010. Вып. 2.
7. Зотиков А.С., В.А. Лашков Коэффициент восстановления скорости при ударе абсолютно упругой частицы в форме эллипсоида вращения Вестник СПбГУ. Сер. 1. Т. 1(59). 2014. Вып. 2.
8. Фомин В. М., Гулидов А. И., Сапожников Г. А. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. 600 с.
9. Ansys, Explicit Dynamics. Chapter 1:IntroductionExplicitDynamics.

10. Johnson G. R., Cook W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of 7th Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983. P. 541–547.
11. Ходко А.А. Особенности выбора модели пластичности металла деформируемой заготовки при численном исследовании процесса гидродинамической штамповки. issn 1727-7337. Авиационно-космическая техника и технология, 2014, № 5 (112).
12. Машиностроение. Энциклопедический справочник под ред. Акад. Е. А. Чудакова // ГНТИ машиностроительной литературы. М., 1948. Т. 2. 891 с.